

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"**

СУХОВІЙ НІНА ОЛЕГІВНА



УДК 621.382; 621.383

**НАНОТЕМПЛЕТИ ДЛЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР  
НІТРИДІВ ІІІ ГРУПИ**

**Спеціальність 05.27.01 – Твердотільна електроніка**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в ДП «Науково-дослідний інститут мікроприладів» НТК “Інститут монокристалів” НАН України та на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Осінський Володимир Іванович**  
ДП "Науково-дослідний інститут мікроприладів" НТК "Інститут монокристалів" НАН України, Центр оптоелектронних технологій, директор

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Большакова Інеса Антонівна**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
професор кафедри напівпровідникової електроніки

кандидат технічних наук  
**Лебедєва Тетяна Станіславівна**  
Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, старший науковий співробітник

Захист відбудеться "20" листопада 2018 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.002.08 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського" за адресою: 03056, м.Київ, вул. Політехнічна, 16, корп. № 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий "8" жовтня 2018 р.



Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н., доцент

В.Г. Артюхов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** Особливість електрофізичних властивостей кремнію обмежує його застосування для оптоелектронних елементів та для приладів НВЧ техніки. У цій області вже давно використовуються напівпровідникові з'єднання групи  $A_3B_5$ , такі, як GaAs, AlAs, InP, GaP і їх тверді розчини. Але значні переваги мають нітриди елементів III групи, особливістю яких є здатність до утворення твердих розчинів, що дозволяє безперервно змінювати ширину забороненої зони від 6,2 eV (AlN) до 3,4 eV (GaN) і до 0.64 eV (InN). Це зумовлює можливість використання III-нітридів у ширшому спектральному діапазоні в інтегральній оптоелектроніці високих потужностей і високих частот в умовах високої температури. Одним із стримуючих факторів впровадження інтегральних схем на основі III-нітридів є їх структурна недосконалість, що пов'язано в першу чергу з відсутністю дешевих III-нітридних підкладок. Епітаксія III-нітридів здійснюється переважно на підкладках сапфіру, карбіду кремнію та кремнію, і має місце невідповідність постійних кристалічних ґраток і коефіцієнтів термічного розширення, що призводить до істотних пружних деформацій в плівках. Інтеграція кремнієвої технології і технології прямозонних ґратково - узгоджених з кремнієм напівпровідникових твердих розчинів III - нітридів - один з найбільш перспективних напрямків щодо створення нового покоління монолітних інтегральних схем. При суміщенні кремнію з гетероструктурами нітридів III групи необхідна наявність оптимальних узгоджувачів темплетно-буферних шарів. Темплетним ("template" означає «шаблон») будемо називати шар на поверхні епітаксійного росту, якщо він хімічно зв'язаний з цією поверхнею, сприяє зародкоутворенню в певних місцях вихідної поверхні під час росту нового епітаксійного шару, зумовлюючи зменшення числа дефектів, порівняно з вихідною поверхнею, і не є суцільним, тобто містить наскрізні отвори певних розмірів (від десятка сотень мікрон до одиниць нанометрів), які заповнюються селективно при епітаксії повністю або частково [1, 4, 6]. Використання темплетних шарів є перспективним для отримання малодислокаційних гетероструктур на III-нітридах при виготовленні потужних НВЧ приладів, що працюють при високих температурах, фотоприймачів, лазерів, світлодіодів та сонячних елементів, здатних працювати в широкій області спектру випромінювання і поглинання, а також інтегральних схем на їх основі [1, 4, 6, 7, 10, 14, 16].

Однією з проблем інтегральної оптоелектроніки з гетероструктурами III-нітридів, які й досі ще вирощуються переважно уздовж полярної (0001) орієнтації, є те, що цей кристалографічний напрямок зумовлює наявність інтенсивного п'єзоелектричного поля, що знижує ефективність випромінювання і поглинання. Дослідження в цьому напрямі ведуться в усьому світі. До того ж, в даний час не існує остаточних висновків щодо оптимальних способів формування малодислокаційних шарів гетероструктур III-нітридів як полярної, так і неполярної та напівполярної кристалографічних орієнтацій [4, 7, 11, 16].

Останнім часом основні зусилля були зосереджені на формуванні неупорядкованих нанотемплетів, в яких унеможливлене здійснення прецизійного контролю розмірів і розташування наноструктур, наприклад, квантових точок, нанодротів, тощо, необхідних для створення інтегральної оптоелектроніки нового покоління. Зокрема, квантові точки з можливістю контролю розмірів і розташування на основі III-нітридів є перспективними кандидатами в якості однофотонних джерел для оптичних квантових обчислень і процесорів світла (енесторів) [16, 19].

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Виконані в роботі дослідження є продовженням та розвитком робіт, котрі проводились на кафедрі мікроелектроніки факультету електроніки Національного технічного університету України “КПІ ім. Ігоря Сікорського” та ДП «НДІ Мікроприладів» НТК «Інститут монокристалів» НАН України і пов'язані з розробкою та проектуванням перспективних світлодіодних пристроїв та фотоприймачів потенційно широкого застосування. Дослідження проводились у відповідності до програм наукових досліджень ДП «Науково-дослідний інститут мікроприладів» НАН України, включаючи: ДКР за розпорядженнями Президії НАН України 2011 – 2013 р. «Впровадження інтегральної технології Si/III - нітридних світловипромінюючих структур» (№ державної реєстрації 0109U007137) та 2014 р. «Впровадження технології формування нанотемплетних шарів на кремнієвих підкладках великого діаметру для інтегральної технології III-нітридних світловипромінюючих структур» (№ державної реєстрації 0114U004328) та такі програми міжнародного співробітництва, як Фонд фундаментальних досліджень України з республікою Білорусь в рамках НДР № Ф41.2/018 «Розробка наукових основ технології темплетних наноструктур інтегральних оптоелектронних елементів на III-нітридах» (Ф41/70-2012, № державного реєстру 0112U003621) і міжнародний грант на спільну наукову діяльність з Туреччиною, The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK), реєстраційний номер 2216, 05/2015–05/2016, «Розробка III-нітридних шарів з низькою щільністю дефектів за допомогою комбінації ALD і MOCVD нанотемплетів на кремнієвих підкладках» (“Development of low-defect density III-Nitride layers via combination of ALD and MOCVD on nano-templated Si substrates”).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка основ технології формування нанотемплетів з гетероструктурами III-нітридів, що забезпечують малodefектність і можливість контролю розмірів і розташування наногетероструктур (квантових точок, нанодротів, тощо) для інтегральної оптоелектроніки.

Для досягнення поставленої мети необхідно було провести дослідження для розв'язання наступних задач:

1. Аналіз методів формування нанотемплетів та гетероепітаксійних шарів III-нітридів.
2. Вибір способу формування нанотемплетних шарів з можливістю одержання малodefектних епітаксійних гетероструктур III-нітридів.

3. З'ясування можливості отримання малодфектного неполярного GaN із застосуванням темплетів на базі обраного варіанту нанотемплету.

4. Дослідження і розробка основ технології формування нанотемплетів з гетероструктурами III-нітридів, що забезпечують малодфектність, неполярність і контроль розмірів та розташування наногетероструктур (квантових точок, нанодротів, тощо) для інтегральної оптоелектроніки.

*Об'єкт дослідження:* гетероструктури III-нітридів, нанотемплети.

*Предмет дослідження:* технологічні режими формування III-нітридів та нанотемплетів, їх структурні та електро-оптичні властивості.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених завдань використовувалися сучасні експериментальні методи формування гетероструктур III-нітридів (газофазне осадження з використанням металоорганічних сполук, хлорид-гідридна газофазна епітаксія) та дослідження структурних та електро-оптичних властивостей гетероструктур III-нітридів та нанотемплетів (методи електронної та атомно-силової мікроскопії, холовські і фотолюмінісцентні вимірювання, рентгеноструктурний аналіз, метод проведення характеристики вторинною іонною мас-спектроскопією, метод струмів, індукованих електронним променем); методи вирішення математичних задач на ЕОМ.

**Наукова новизна.** В дисертації вперше одержані такі наукові результати:

В процесі досліджень в даній дисертаційній роботі вперше одержані наступні результати:

1. На базі запропонованої математичної моделі процесу зародження дефектів отримано низьку щільність дефектів укладки для епітаксійних гетероструктур нітриду галію неполярної кристалографічної орієнтації (11 $\bar{2}$ 0) на нанотемплетах анодованого оксиду алюмінію на кремнії порівняну з результатами на основі методів одноступеневого латерального зростання або за допомогою буферних шарів на сапфірі і на карбіді кремнію.

2. Досліджена і розроблена базова нелітографічна технологія передачі малюнку гексагональних нанопір темплету анодованого оксиду алюмінію на маску SiO<sub>2</sub> з можливістю здійснення контролю розмірів і розташування малодфектних неполярних наногетероструктур III-нітридів (нанодротів, нанокілець та квантових точок) для оптоелектронних інтегральних схем, на що отримано патент на корисну модель.

3. Досліджено і розроблено базову технологію формування малодислокаційних шарів нітриду галію на темплетах нанотекстурованого сапфіру на основі запропонованої математичної моделі і використання пристрою для епітаксійного вирощування гетероструктур, на який отримано патент на корисну модель, що забезпечує в УФ GaN фотодіодах з бар'єром Шоткі крутіший довгохвильовий (375-475 нм) край нормованої фоточутливості, зменшуючи її на порядок в цьому діапазоні порівняно з фотодіодами без темплету нанотекстурованого сапфіру, що дозволяє фіксувати таке випромінювання без спеціальних оптичних фільтрів.

4. В плані досліджень нанокарбідних процесів при MOCVD-епітаксії III-нітридів на нанотемплетах сапфіру експериментально визначені термодинамічні параметри (температура, тиск) і прекурсори, при яких реалізується самоформування консолідованих нанокарбідів, інкапсульованих в атомну структуру карбонітриду алюмінію або бору для шарів акумулювання енергії.

### **Практична значимість роботи**

1. Запропоновано математичну модель щодо розрахунку параметрів нанотемплетів – радіусу та висоти нанопор для одержання бездислокаційних наноструктур нітридів III-групи з метою покращення характеристик, підвищення квантового виходу і подовження терміну служби високоефективних пристроїв інтегральної оптоелектроніки.

2. Розроблені у роботі основи технології виготовлення темплетів на базі нанопоруватого оксиду алюмінію дозволяють при різних ступенях неузгодження кристалічних ґраток формувати низькодефектні епітаксійні шари III-нітридних гетероструктур, що є базовою складовою для виробництва високоефективних світлодіодів і фотоприймачів для оптоелектронних інтегральних схем нового покоління на їх основі.

3. Розроблена послідовність технологічного процесу прецизійної передачі малюнку гексагональних нанопір темплету анодованого оксиду алюмінію на  $\text{SiO}_2$  з можливістю одержання малодефектних епітаксійних наноструктур III-нітридів (нанодротів, квантових точок, тощо) дозволяє у сформованих в  $\text{SiO}_2$  масивах нанопір епітаксійно вирощувати масиви наностержнів GaN висотою товщини маски з малою щільністю дефектів, на яких вирощуються 4-періодні квантові ями InGaN/GaN, що підвищує ефективність випромінювання втричі.

4. Була визначена можливість інтеграції Si-KМОП-технології з розробленим процесом формування InGaN/GaN квантових точок, котрі, як відомо, демонструють велику енергію зв'язування екситонів ( $>26$  меВ) і являються ідеальним кандидатом в якості джерел однофотонного випромінювання для високотемпературної квантової обробки інформації, квантової криптографії і квантових енесторів, на відміну від квантових точок типу Странського-Крастанова з великою хаотичністю щодо коливання розмірів і розташувань.

5. Експериментально показано, що масиви GaN наностержнів з конусоподібним обрамленням та InGaN/GaN квантовими ямами мають певні переваги перед «плоскими», а саме, підвищення ефективності випромінювання втричі за рахунок утворення квантових точок і нанокілець на фасетованих поверхнях наностержнів з наявністю неполярної і напівполярної кристалографічної орієнтації, що за рахунок можливості входження більшої мольної частки індію розширює спектр випромінювання в бік більшої довжини хвиль, що використовується у розробках НДІ Мікроприладів для систем перетворення сонячного випромінювання.

6. Розроблена технологія формування темплетів нанотекстурованого сапфіру, на яких сформовані фотоприймачі ультрафіолетового діапазону довжин хвиль 190-390 нм. Спектри фоточутливості діодів Шоткі мають різкий край, а саме, на порядок зменшену нормовану фоточутливість до світла зі сторони видимого спектру, що дозволяє використовувати їх як селективні фотоприймачі без УФ оптичних фільтрів навіть при сонячному освітленні. Виготовлені УФ фотоприймачі використовуються для апаратури екологічного призначення (ДП «НДІ Мікроприладів» НТК «Інститут монокристалів» НАН України) і по договору були поставлені на фірму Agnitron (США).

7. Одержані нанотемплети текстурованого сапфіру для шарів акумулювання енергії використовуються в розробках НДІ Мікроприладів для оптоелектронних інтегральних схем космічного, біологічного та військового призначення завдяки високій термічній, хімічній та радіаційній стійкості сапфіру і ІІІ-нітридів, де традиційний кремній не підходить.

#### **Особистий внесок здобувача:**

Список наукових праць дисертанта, в яких викладено основні результати дисертаційної роботи, наведено в списку літератури. В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить теоретичний аналіз, розробка моделі, експериментальне дослідження і розробка технологічних маршрутів щодо виготовлення малодфектних гетероструктур ІІІ-нітридів з нанотемплатами, аналіз одержаних результатів та написання статей.

#### **Апробація результатів роботи**

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 6 міжнародних конференціях:

1. IV международная научно-техническая конференции молодых ученых «Электроника 2011», 29–31 марта 2011 года, Киев, Украина.
2. XXXI Международной научно-технической конференции «Электроника и нанотехнологии», 12–14 мая 2011 г., Киев, Украина.
3. 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия, алюминия – структуры и приборы», 2011 г., С.-Петербург, Россия.
4. 9-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия, алюминия– структуры и приборы», 2013, МГУ, Россия.
5. 2014 IEEE XXXIV International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kiev, Ukraine.
6. 2017 IEEE 37 International Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO) // Kiev, Ukraine, (oral session).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 19 наукових праць: 11 статей у наукових фахових виданнях (з яких 9 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, 2 статті у наукових виданнях іноземних держав), 6 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій та 2 патенти на корисну модель.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 130 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Обсяг основного тексту дисертації складає 124 сторінки друкового тексту. Робота ілюстрована 1 таблицею та 39 рисунками. Список використаних джерел містить 98 найменувань, з них 23 кирилицею та 75 латиницею.

## **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ**

В дисертаційній роботі в ході досліджень гетероструктур нітридів III групи з нанотемплатами отримані наступні теоретичні та науково-практичні результати:

1. На базі запропонованої математичної моделі процесу зародження дефектів для епітаксійних наногетероструктур нітриду галію неполярної кристалографічної орієнтації на нанотемплатах анодованого оксиду алюмінію на кремнії отримано низьку щільність дефектів  $\sim 3 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$  порівняну з результатами на основі методів одноступеневого латерального зростання або за допомогою буферних шарів на сапфірі і на карбіді кремнію (у доступних промислових зразках оптоелектронних приладів  $\sim 10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ).

2. Розроблена і досліджена базова нелітографічна технологія передачі малюнку гексагональних нанопір темплету анодованого оксиду алюмінію на маску  $\text{SiO}_2$  з можливістю здійснення контролю розмірів і розташування малодфектних неполярних наногетероструктур III-нітридів (нанодротів, нанокілець та квантових точок) для оптоелектронних інтегральних схем, на що отримано патент на корисну модель.

3. Досліджено і розроблено базову технологію формування малодислокаційних шарів нітриду галію на темплатах нанотекстурованого сапфіру на основі запропонованої математичної моделі і використання пристрою для епітаксійного вирощування гетероструктур, на який отримано патент на корисну модель, що забезпечує в УФ GaN фотодіодах з бар'єром Шоткі крутіший довгохвильовий (375-475 нм) край нормованої фоточутливості, зменшуючи її на порядок в цьому діапазоні порівняно з фотодіодами без темплету нанотекстурованого сапфіру, що дозволяє фіксувати таке випромінювання без спеціальних оптичних фільтрів.

4. В плані досліджень нанокарбідних процесів при MOCVD-епітаксії III-нітридів на нанотемплатах сапфіру експериментально визначені термодинамічні параметри (температура, тиск) і прекурсори, при яких реалізується самоформування консолідованих нанокарбідів, інкапсульованих в атомну структуру карбонітриду алюмінію або бору для шарів акумулювання



енергії.

5. Розроблені у роботі основи технології виготовлення темплетів на базі нанопоруватого оксиду алюмінію дозволяють при різних ступенях неузгодження кристалічних ґраток формувати низькодефектні епітаксійні шари III-нітридних гетероструктур з можливістю одержання малодфектних епітаксійних наноструктур III-нітридів, що є базовою складовою для виробництва високоефективних світлодіодів і фотоприймачів для оптоелектронних інтегральних схем нового покоління на їх основі.

6. Розроблена послідовність технологічного процесу прецизійної передачі малюнку гексагональних нанопір темплету анодованого оксиду алюмінію на  $\text{SiO}_2$  з можливістю одержання малодфектних епітаксійних наноструктур III-нітридів (нанодротів, квантових точок, тощо) дозволяє у сформованих в  $\text{SiO}_2$  масивах нанопір епітаксійно вирощувати масиви наностержнів GaN висотою товщини маски з малою щільністю дефектів, на яких вирощуються 4-періодні квантові ями InGaN/GaN, що підвищує ефективність випромінювання втричі.

7. Експериментально показано, що масиви GaN наностержнів з конусоподібним обрамленням і InGaN/GaN квантовими ямами мають певні переваги перед «плоскими», а саме, підвищення ефективності випромінювання втричі за рахунок утворення квантових точок і нанокілець на фасетованих поверхнях наностержнів з наявністю неполярної і напівполярної кристалографічної орієнтації, а також розширення спектру випромінювання в бік більшої довжини хвиль за рахунок можливості входження більшої мольної частки індію.

8. Розроблена технологія формування темплетів нанотекстурованого сапфіру, на яких сформовані фотоприймачі ультрафіолетового діапазону довжин хвиль 190-390 нм. Спектри фоточутливості діодів Шоткі мають різкий край, а саме, на порядок зменшену фоточутливість до світла зі сторони видимого спектру, що дозволяє використовувати їх як селективні фотоприймачі без УФ оптичних фільтрів навіть при сонячному освітленні. Виготовлені УФ фотоприймачі використовуються для апаратури екологічного призначення (ДП «Науково-дослідний інститут мікроприладів» НТК «Інститут монокристалів» НАН України) і по договору були поставлені на фірму Agnitron (США).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладена основна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми дослідження, сформульована мета роботи і завдання, які необхідно вирішити, викладена наукова новизна і практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі дисертації проведено огляд робіт, присвячених властивостям та проблемам застосування гетероструктур нітридів III групи а також нанотемплетам (шарам на поверхні епітаксійного росту, хімічно зв'язаним з цією поверхнею, що сприяють

зародкоутворенню під час росту нового епітаксійного шару, зумовлюючи зменшення числа дефектів, порівняно з вихідною поверхнею, і не є суцільними, тобто містять наскрізні отвори певних розмірів (від десятка сотень мікрон до одиниць нанометрів), які заповнюються селективно при епітаксії повністю або частково).

Розглянуто існуючі темплетно-буферні шари для гетероепітаксії напівпровідникових наноструктур на основі нітридів III групи, що знаходяться в центрі уваги сучасних досліджень і визнані ключовими компонентами сучасної оптоелектроніки. Визначено доцільність використання нанотемплетів з контрольованістю конфігурації і розмірів.

Винятковий інтерес представляє створення світловипромінюючих елементів на основі неполярних та напівполярних III-нітридних гетероструктур, але незалежно від того, полярна, неполярна або напівполярна орієнтація, проблеми невідповідності кристалічних ґраток при формуванні гетероструктур залишаються в плані пошуку оптимальних темплетних шарів.

Виходячи з аналізу особливостей методів формування нанотемплетів для гетероструктур нітридів III групи визначена мета і задачі дисертаційної роботи.

**Другий розділ дисертації** присвячений аналізу процесів зародження дислокацій зміщення, що виникають при гетероепітаксії з нанотемплатами, і характеристичності нанотемплетів.

Розглянуто підхід до розрахунку щільності дислокацій у тонких шарах гетероструктур (рис. 1, а), де напруження приблизно однорідні і ключовим параметром є критична товщина шару,  $h_c$ , менше за яку, напруження припускаються майже повністю пружними, а вище за яку, релаксація напруження стає енергетично більш прийнятною, і на границі розподілу з'являються дислокації зміщення згідно класичному критерію Мес'юс-Блекеслі (МБ):

$$p = 0, \quad h \leq h_c$$

$$p = \left(\frac{\Delta\varepsilon}{|b|}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{h_c}{h}\right)^2, \quad h \geq h_c, \quad (1)$$

де  $p$  – щільність дислокацій на одиницю площі,  $b$  – вектор Бюргерса,  $h$  – товщина плівки,  $h_c$  – критична товщина,  $\Delta\varepsilon$  – параметр невідповідності ґраток,  $\Delta\varepsilon = 2(a_f - a_s)/(a_f + a_s)$ , де  $a_f$ ,  $a_s$  – параметри ґраток плівки і підкладки відповідно.

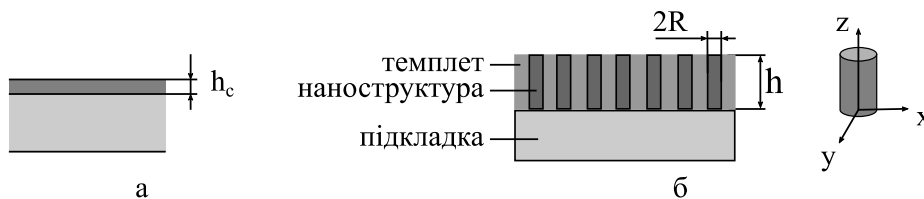


Рис. 1. Схематичне зображення геометрії гетероепітаксійних двовимірних тонких гетерошарів (а) і тривимірних гетероструктур нанотемплетів (б).

Проаналізовано процеси зародження дислокацій в тривимірних гетероструктурах нанотемплетів, для яких, на відміну від тонких гетерошарів (рис. 1, а, б), у класичному критерії МБ (1) виникає потреба врахування неоднорідності напружень і обмеженості об'єму наноструктур щодо зміни енергії дислокації [1, 4, 8, 15, 16].

Відповідно, для тривимірних гетероструктур з нанотемплетами для розрахунку критичної товщини,  $h_c$ , щодо виникнення дислокацій, досліджено наступне співвідношення:

$$h_c(R) = \frac{E_d\left(\frac{h_c}{R}\right)}{kb\Delta\epsilon g\left(\frac{h_c}{R}\right)}, \quad (2)$$

де  $k = 2\mu \frac{1+\nu}{1-\nu}$  – біаксіальний модуль, де  $\mu$  – стала Ламе;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$E_d$  – енергія дислокації тривимірного наноутворення:

$$E_d = E_{d,\infty} + \sum_{n=1}^{\infty} E_I(4Rn) - E_I[(2n-1)2R],$$

де  $E_{d,\infty}$  – власна енергія дислокації у необмеженому середовищі;  $n$  – порядок системи;  $R$  – радіус наноутворення;  $E_I$  – енергія взаємодії між дислокаціями:

$$E_I[d] = \frac{\mu b_1^2}{4\pi(1-\nu)} (\ln(4a^2 + 1) + 4a^2 \frac{4a^2+3}{(4a^2+1)^2} + \frac{\mu b_2^2}{4\pi(1-\nu)} \ln(4a^2 + 1) + 4a^2 \frac{12a^2+1}{(4a^2+1)^2} + \frac{\mu b_3^2}{4\pi} \ln(4a^2 + 1),$$

де  $a = h/d$ , де  $d$  – відстань між уявними дислокаціями;  $h$  – висота наноутворення.

На основі виразу (2) побудовані криві умовно бездислокаційного рельєфу (рис. 2, рис. 3а) в залежності від розмірів наноструктур (радіус  $R$ , висота  $h$ ) при різних ступенях неузгодження ґраток. Для чисельного дослідження напруженого стану в наноструктурах замість комерційної програми кінцевих елементів ABAQUS використовувалась розроблена нами програма, верифікація якої, у порівнянні з базовою (рис.2), показала, що похибка не перевищує 5 %.

З'ясовано, що для великих радіусів наноструктур, більших за критичний радіус,  $R_c$  (рис.2,б), криві бездислокаційного рельєфу асимптотично сходяться до вирішення граничної товщини шару. Тим не менш, для малих радіусів наноструктур ( $< R_c$ ) спостерігається значне відхилення від граничної товщини і криві бездислокаційного рельєфу домінуються тривимірним обмеженням. Тобто, для нанотемплетів з радіусами нанопір меншими за критичний, бездислокаційність може бути досягнута при  $h > h_c$ , на відміну від варіанту напружених двовимірних шарів.

Згідно результатів огляду першого розділу, одним із перспективних способів формування нанотемплетів є технологія на базі анодного оксиду алюмінію, яка останнім часом привертає все більше уваги щодо багатьох застосувань в оптоелектроніці. Зокрема, нами розглянуто можливості застосувань і представлені основні технологічні вимоги до виготовлення світлодіодних матриць на анодованому оксиді алюмінію [2].

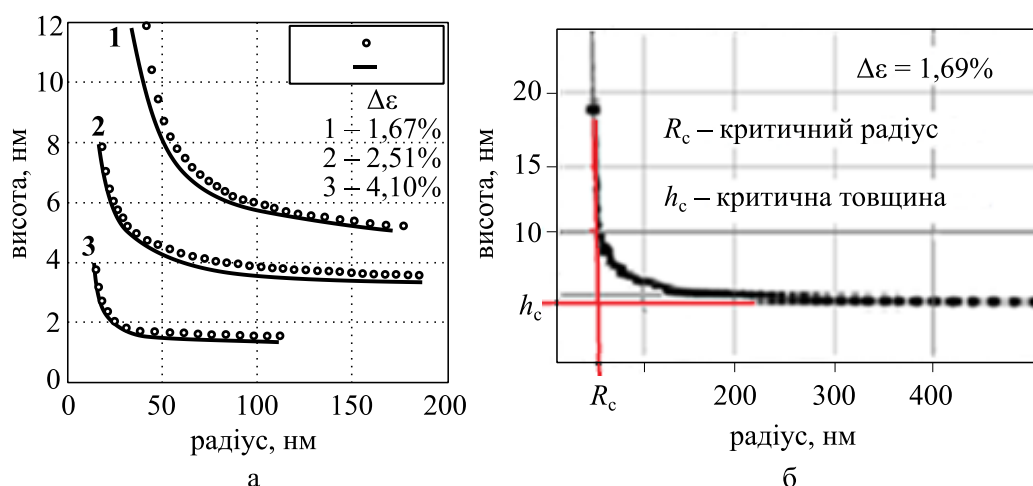


Рис. 2. Криві умовно бездислокаційного рельєфу (радіус  $R$  і висота  $h$ ) при різних параметрах невідповідності ґраток,  $\Delta\epsilon$ : (o o o o) – результати згідно базової програми; (—) – результати нашої програми.

Нанотемплет анодного оксиду алюмінію (АОА) представляє гексагональну матрицю з циліндричними нанопорами, розміри яких регулюються складом електроліту і прикладеною напругою, і мають здатність до високого ступеню самовпорядкованості. Нанопори являють собою паралельні циліндри, що не перетинаються, відносно подібні за розмірами, досить однорідні й гексагонально орієнтовані, що робить їх придатними для осадження наноутворень. Діаметр пор,  $D$ , може змінюватись в межах  $\sim 10 \text{ нм} < D < \sim 7000 \text{ нм}$ .

Нами були досліджені АОА-структури, сформовані на шарах алюмінію товщиною 1 мкм, осаджених електронно-променевим напыленням на кремнієвій підкладці n-типу електропровідності із кристалографічною орієнтацією (100) і поверхневим опором  $40 \text{ Ом}/\square$ . Після досліджень в процесі електрохімічного двоступінчастого анодування, що здійснювалося у водяних розчинах щавлевої, малонової та винної кислот, у гальваностатичному режимі при напругах 39-45 В, 73-75 В та 185-190 В, відповідно, згідно структурної досконалості (рис.3) для подальшого формування Ш-нітридних наноструктур було обрано розчин щавлевої кислоти.

Зображення відколу (перетин) АОА темплету в растровому електронному мікроскопі (РЕМ) представлено на рис. 3, а. Морфологія і геометрія поверхні темплетних наноструктур пористого оксиду алюмінію були детально досліджені засобами атомно-силової мікроскопії (АСМ), мікроскоп "DI NanoScope IIIa". Вимірювання проводилися в режимі періодичного контакту. При цьому застосовувалися кремнієві зонди фірми "NT-MDT" марки "CSG 10" з золотим відбиваючим покриттям. Номінальний радіус кривизни вістря зонду становив 10 нм. Типове тривимірне зображення поверхні досліджуваних АОА нанотемплетів показано на рис. 3, рис. 4.

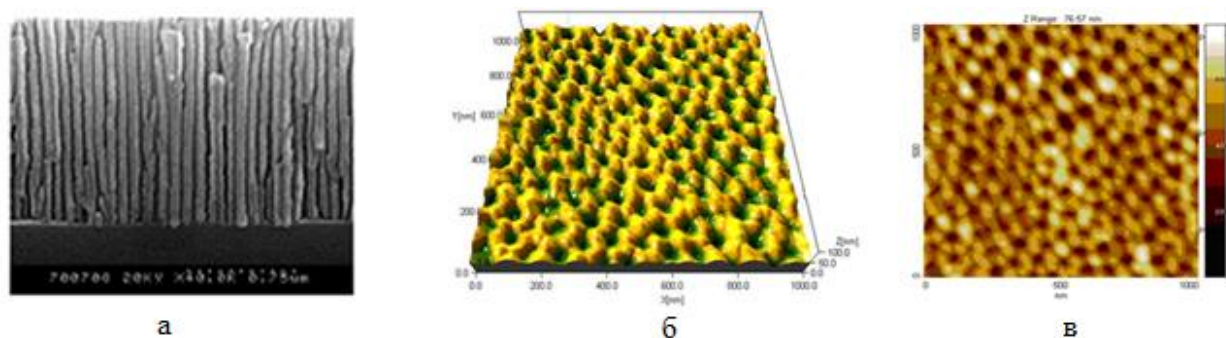


Рис. 3. Нанотемплети АОА (електрохімічне анодування, гальваностатичний режим; водний розчин щавлевої кислоти): а – зображення відколу перетину зразка нанотемплету (РЕМ); б - АСМ тривимірне зображення поверхні; в - вид згори нанорельєфу. Площа сканування  $1 \times 1$  мкм.

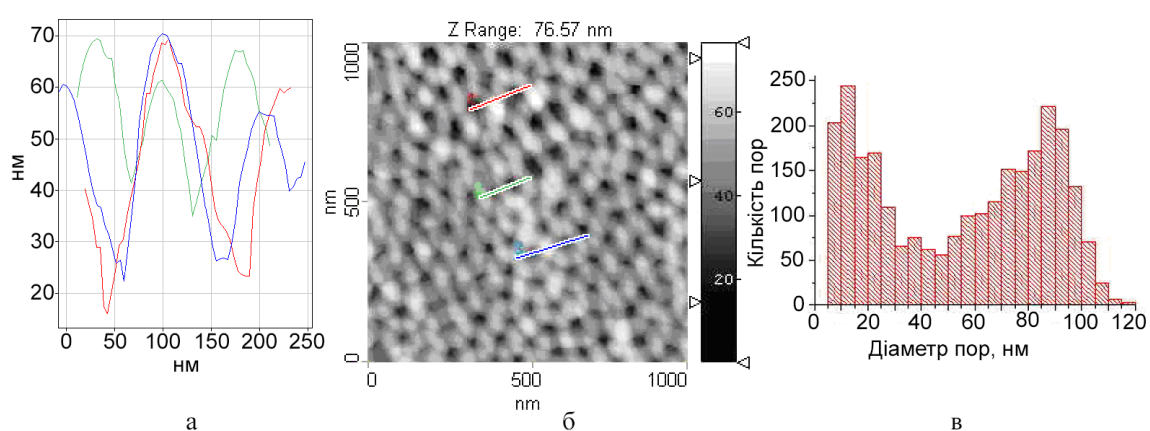


Рис. 4. (а) - поперечні профілі нанорельєфу в окремих ділянках нанотемплету АОА; (б) - ділянки відповідають різним областям поверхні оксиду; (в) - типовий розподіл діаметрів пор досліджуваних зразків (АСМ).

Площа сканування поверхні на наведеному зображенні становить  $1 \times 1$  мкм. Але проведені дослідження показали, що подібна картина спостерігається і при більш широкому скануванні: на площинах  $3 \times 3$  мкм та  $5 \times 5$  мкм зразки також зберігають такий самий ступінь однорідності та періодичності структури. Нанопори АОА темплетів, згідно двовимірному зображенню нанорельєфу (рис. 3, в) демонструють геометричне розташування, дуже близьке до правильного гексагонального, а відстань між сусідніми порами є цілком співрозмірною з діаметром пори що створює сприятливі умови для подальшого росту в них наносистем III- нітридів.

Шляхом математичної апроксимації форми кожної окремої пори до ідеального шестикутника побудовано статистичний розподіл діаметрів пор по площі поверхні. Типовий приклад такого розподілу наведено на рис. 4 а, б. Детально розглянувши та проаналізувавши цей розподіл, можна зробити висновок про його яскраво виражену бімодальність: в залежності від режимів електрохімічного анодування переважна кількість пор має діаметри  $\sim 20$ - $30$  нм або ж  $55$ - $100$  нм

(рис. 4. в)

На одержаних зразках нанотемплетів також запропоновано і реалізовано нетрадиційний метод отримання кластерів гетерогенних і гомогенних наноструктур оксидонітридів алюмінію шляхом заміщення частини атомів кисню низькоенергетичними іонами азоту в твердій фазі всередині нанопір  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; експериментально отримані нанопіри  $\text{AlN}$ ,  $\text{AlN}_x\text{O}_{1-x}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та показана можливість заміщення атомів кисню атомами азоту при порівняно низькій температурі і енергії іонів, необхідній для розриву хімічних зв'язків  $\text{Al-O}$  і вбудовування атомів азоту в плівку з утворенням  $\text{AlN}$ ,  $\text{AlN}_x\text{O}_{1-x}$  локальних фаз, для нанопористих самоорганізованих шарів анодного оксиду алюмінію, що можуть бути перспективними нанореакторами для оптоелектронних і надшвидкісних елементів [3, 17, 18].

Показано, що в результаті управління технологічними параметрами в процесі формування III-нітридів і темплетно-буферних шарів анодного оксиду алюмінію можлива монолітна-інтеграція RGB світлодіодів на кремнієвій підкладці [6].

**У третьому розділі** досліджена, запропонована та реалізована нелітографічна технологія на базі розроблених нанотемплетів анодного оксиду алюмінію, що дозволяє одержувати малодфектні гетероепітаксійні III-нітридні наноструктури за допомогою МОС-гідридної і хлорид-гідридної епітаксії.

Згідно аналітичного огляду, проведеного в Розділі 1, оптоелектронні прилади на основі III-нітридів при неполярній орієнтації отримують все більше уваги протягом останніх років у зв'язку з можливістю позбутися квантово-розмірного ефекту Штарка. Відсутність внутрішнього п'єзоелектричного поля зумовлює переваги не тільки у підвищенні квантового виходу, а також у покращенні стабільності. Але нещодавно впровадженні технології вирощування III-нітридних шарів неполярного і напівполярного напрямків ще далекі від досконалості порівняно з технологіями уздовж полярного (0001) напрямку. Проростаючі дислокації і дефекти укладки типу «stacking faults, (SF)» є домінуючими і становлять на сьогодні головну перешкоду для підвищення ефективності оптоелектронних приладів.

Нами продемонстрована можливість і доцільність використання розроблених нанотемплетів АОА на підкладці  $\text{Si}(100)$  з використанням хлорид-гідридної епітаксії. Отримані нанотемплети можуть використовуватися для вирощування високоякісних малодфектних товстих шарів неполярного  $\alpha\text{-GaN}$  кристалографічної орієнтації  $(11\bar{2}0)$  зі зниженою щільністю дефектів укладки (SF), порівняною з результатами на основі методів одноступеневого латерального зростання на сапфірі або за допомогою буферних шарів на карбіді кремнію [1, 4, 14, 16].

В ході дослідження нанотемплету АОА в процесі МОС-гідридної епітаксії при стандартних режимах формування виявлене заростання поверхні нітриду галію, обумовлене високим коефіцієнтом прилипання атомів галію до АОА ( $P_{\text{Ga}/\text{AOA}} \sim 1$ ), що унеможливило формування  $\text{GaN}$

наностержнів з InGaN/GaN КТ. В результаті було запропоновано перехід з темплету АОА на SiO<sub>2</sub>, так як коефіцієнт прилипання атомів галію та індію до SiO<sub>2</sub> близький до нуля ( $P_{\text{Ga/SiO}_2} \sim P_{\text{In/SiO}_2} \sim 0$ ).

Досліджена і розроблена базова нелітографічна технологія передачі малюнку гексагональних нанопір темплету АОА на маску SiO<sub>2</sub> для одержання малодфектних неполярних наногетероструктур ІІІ-нітридів (нанодротів, нанокілець та квантових точок) з можливістю контролю розмірів і розташування для оптоелектронних інтегральних схем. Запропонована послідовність технологічного процесу (рис.5, а – г) складається з наступних кроків:

- нанесення на шар нітриду галію методом плазмохімічного осадження шарів SiO<sub>2</sub> (0.1мкм);
- формування нанотемплету АОА;
- селективне травлення шару SiO<sub>2</sub> в плазмі CF<sub>4</sub> для створення масивів нанопір в шарі SiO<sub>2</sub>;
- відпалювання наноструктурованих зразків (реактор EPIQUIP, 600°C, N<sub>2</sub>);
- селективне видалення темплету АОА в 5% фосфорній кислоті, промивка в ацетоні і деіонізований воді;
- МOCVD формування GaN наностержнів в масці SiO<sub>2</sub>;
- формування масивів 4-періодних квантових ям InGaN/GaN.

В результаті одержано GaN наностержні з конусоподібним обрамленням і вертикальними бічними стінками, висотою, що визначається товщиною SiO<sub>2</sub> маски. При дослідженні методом просвічуючої електронної мікроскопії (ПЕМ) встановлено, що перерізи масивів наностержнів GaN мають вертикальні бічні стінки, конусоподібне обрамлення, висота їх визначається товщиною SiO<sub>2</sub> маски, а щільність дислокацій при цьому становить  $\sim 3 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$ .

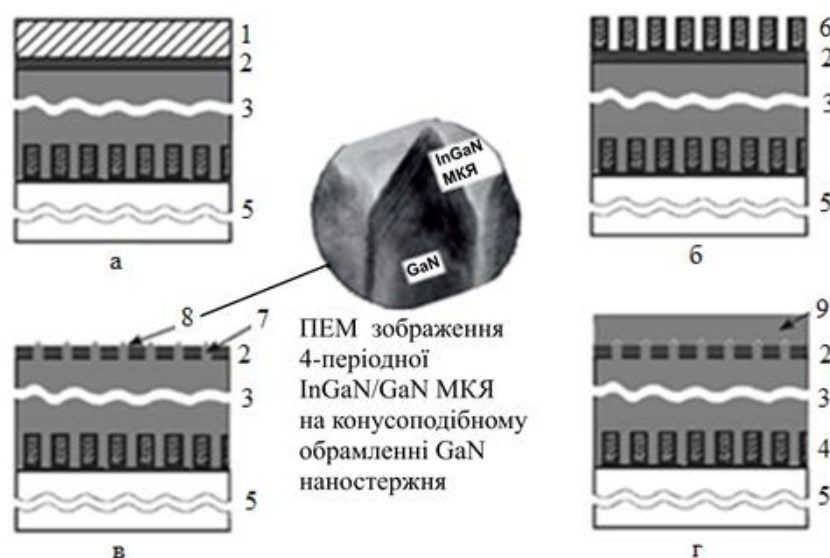


Рис.5. Послідовність технологічного процесу: 1 – Al; 2 – SiO<sub>2</sub>; 3 – товстий шар неполярного GaN, сформований методом хлорид-гідридної газофазної епітаксії; 4 - базовий АОА нанотемплет; 5 – підкладка n-Si(100); 6–АОА нанотемплет для переходу на маску SiO<sub>2</sub>; 7 – наностержні GaN з конусоподібним обрамленням; 8 – InGaN/GaN множинні квантові ями МКЯ на конусоподібному

обрамленні GaN наностержнів; 9 – малодфектний шар GaN.

До теперішнього часу існує проблема вирощування потрібних твердих розчинів  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  з високою концентрацією індію ( $x \geq 0.2$ ). Відомо, що збільшення концентрації індію в таких сполуках приводить до деградації їх структурних і оптичних властивостей із-за фазової сепарації атомів індію. Нами досліджено вплив зміни температури росту і мольної керуючої частки індію, тобто відношення мольного потоку індію до повного потоку III - групи ( $\text{In}/\{\text{In}+\text{Ga}\}$ ), на результати вимірів фотолюмінесценції InGaN КЯ (сталі параметри: час росту КЯ- 3 хв; час росту GaN-бар'єру - 10хв; потік  $\text{NH}_3$  для InGaN КЯ і GaN бар'єру- 4 slm; тиск в реакторі – 400 Торр; газ носій -  $\text{N}_2$ ). Триметил галію (TMGa), триметил індію (TMIn) і аміак були використані як джерела галію, індію та азоту, відповідно. В процесі вибрано оптимальну альтернативну режимну комбінацію низької температури росту і високої частки індію для збільшення пікової довжини хвилі випромінювання InGaN КЯ в системі MOCVD "EPIQUIP" (горизонтальний реактор).

Були досліджені фотолюмінісцентні характеристики (рис. 6, а) структур з 4-періодними GaN/InGaN квантовими ямами на системі GaN наностержнів (рис. 6, б) та на контрольному "планарному" GaN темплетному шарі (рис.6, в).

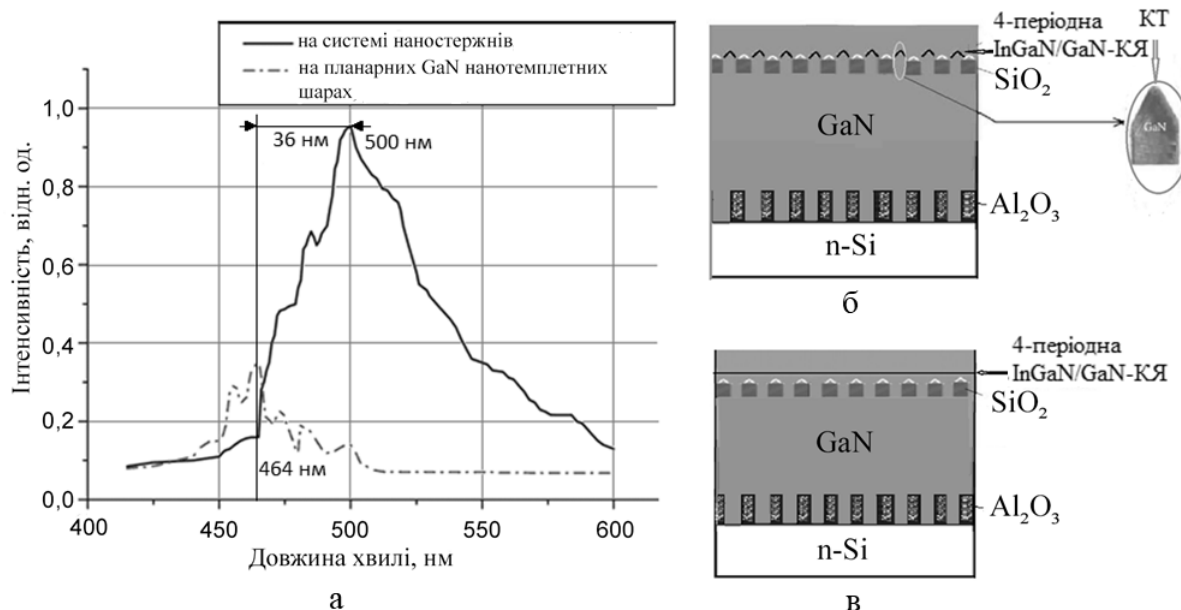


Рис. 6. Фотолюмінесценція GaN/InGaN МКЯ на системі наностержнів (суцільна лінія) і на «планарних» GaN темплетних шарах (пунктирна лінія) – (а); GaN/InGaN МКЯ на системі наностержнів - (б); на "планарних" GaN нанотемплетних шарах - (в).

Випромінювання структур з GaN/InGaN МКЯ на системі наностержнів характеризувалося майже втричі вищою інтенсивністю. Максимум випромінювання був зміщений на 36 нм у бік збільшення довжин хвиль в порівнянні з такими ж квантовими ямами на "планарних" GaN



темплетних шарах. Це свідчить про збільшення в твердому розчині InGaN мольної частки індію, що обумовлене релаксацією напружень (деформації стиснення часто перешкоджають включенню атомів In в грати InGaN), а також завдяки відсутності інтенсивного п'єзоелектричного поля при неполярній (11 $\bar{2}$ 0) орієнтації, фасетуванню поверхні GaN наностержнів з конусоподібним обрамленням і наявністю квантових точок і квантових кілець [7, 11, 13, 14].

Спектри фотолюмінесценції GaN/InGaN МКЯ на "планарних" GaN нанотемплетних шарах (а) і на системі наностержнів (б) отримані при збудженні випромінюванням третьої гармоніки фемтосекундного лазера,  $\lambda = 302$  нм.

Показано, що розроблені нами InGaN/GaN КТ з контрольованим розташуванням на підкладках кремнію можуть забезпечити сумісність інтеграції Si-КМОН-технології і джерел однофотонного випромінювання, що може бути використано для квантових енесторів, квантових обчислень і криптографії [10, 19].

Використання нанотемплетів на базі АОА дає можливість контролювати розміри і розташування InGaN/GaN КТ в масивах сонячних елементів і світловипромінювачів в енесторах (інтегральних процесорах світла з накопиченням енергії).

Джерела однофотонного випромінювання квантові точки InGaN/GaN, як зазначалось в Розділі 1, демонструють велику енергію зв'язування екситонів ( $>26$  меВ), що робить їх ідеальним кандидатом для джерел однофотонного випромінювання при застосуванні у процесах квантової обробки інформації, квантового зв'язку та квантової криптографії. Кубіти фотонів майже без некогерентності і вони можуть функціонувати при кімнатній температурі. До теперішнього часу більшість напівпровідникових КТ епітаксійно вирощуються методами самоорганізаційних процесів типу Странського-Крастанова, що призводить до обмеженого контролю положення та розмірів КТ і ускладнює їх застосування. Розроблені нами InGaN/GaN КТ на базі АОА нанотемплетів з можливістю контролю розташування і розмірів на підкладках кремнію можуть забезпечити сумісність інтеграції Si-КМОН-технології і джерел однофотонного випромінювання, масивів сонячних елементів і світловипромінювачів для інтегральних процесорів світла (енесторів) [10, 19].

**Четвертий розділ** присвячений дослідженню застосувань нанотемплетів текстурованого сапфіру для гетероепітаксійних структур ІІІ-нітридів.

Згідно запропонованої спрощеної математичної моделі, встановлено, що може бути забезпечена низька щільність дислокацій при будь-якій глибині пір при радіусах пір  $< 10$  нм, одержання яких за допомогою нанотемплетів анодного оксиду алюмінію дуже проблематично. Проте, для МOCVD епітаксії (горизонтальний реактор, устаткування EPIQUIP) були експериментально визначені термодинамічні параметри (температура, тиск) та прекурсори, при яких на поверхні сапфіру утворюються нанопори з радіусом  $< 10$  нм. На одержаних нанотемплетах

текстурованого сапфіру була показана можливість в одному технологічному циклі вирощувати гетероепітаксійні шари III-нітридів з низькою щільністю дислокацій, а також формувати консолідовані фази нанокарбідів, інкапсульованих в атомну структуру карбонітриду алюмінію або бору [5, 10, 19].

Розглянуто застосування одержаних нанотемплетів текстурованого сапфіру для УФ-фотодіодів і шарів акумулювання енергії, що можуть використовуватися в оптоелектронних інтегральних схемах космічного, біологічного та військового призначення завдяки високій термічній, хімічній та радіаційній стійкості сапфіру і III-нітридів, де традиційний кремній не підходить.

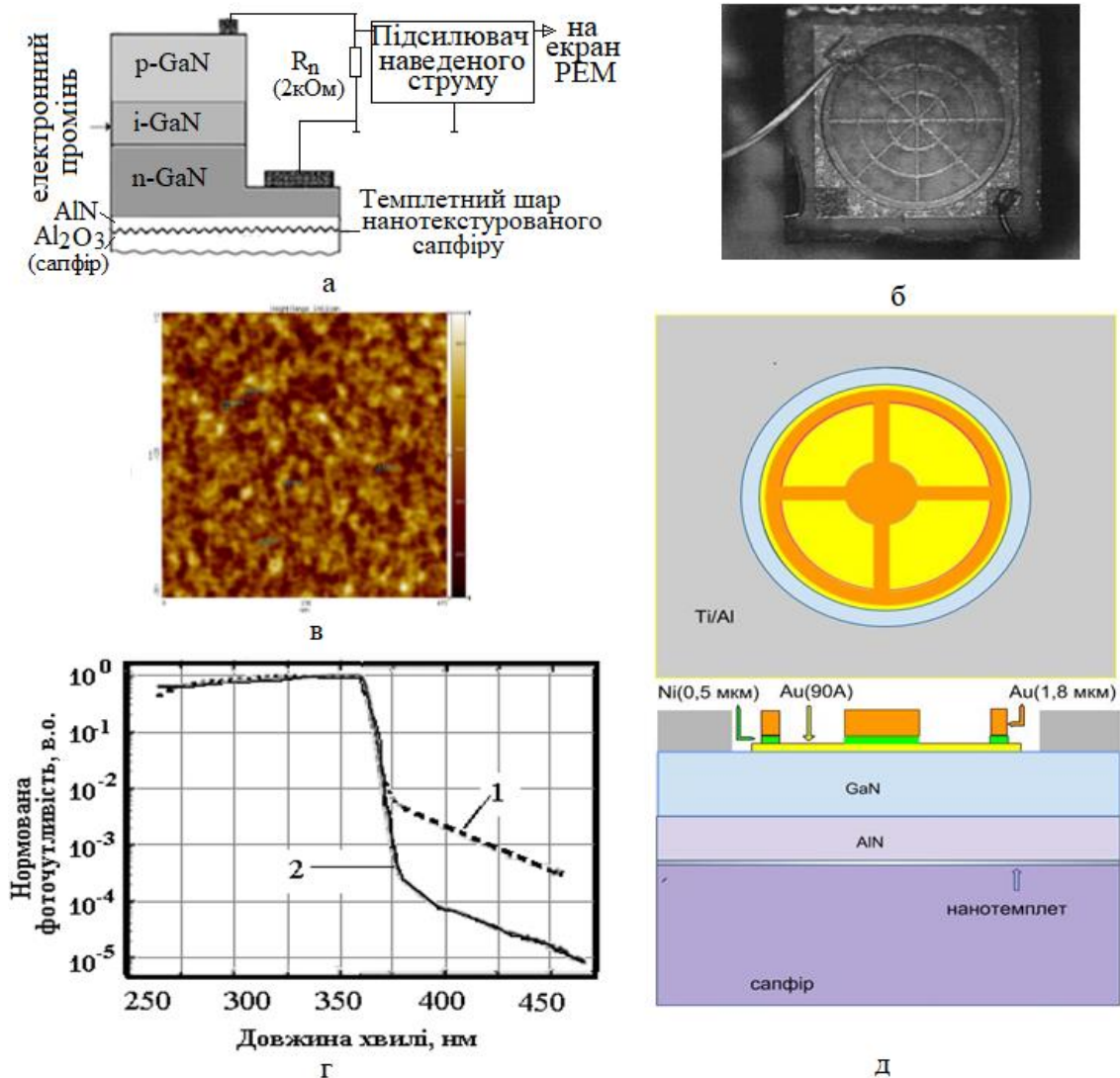


Рис. 7. (а) - блок-схема вимірювання наведеного струму в технологічній структурі р-і-п GaN-фотодіода з темплетним шаром нанотекстурованого сапфіру; (б) - зображення р-і-п GaN-фотодіода з електричними виводами; (в) - АСМ - зображення нанотемплету текстурованого сапфіру (пори  $R_c \leq 10$  нм); (г) - нормована фоточутливість GaN фотодіодів з бар'єром Шоткі: 1 – без нанотемплету текстурованого сапфіру, 2 – з нанотемплетом текстурованого сапфіру; (д) - GaN фотодіод з

бар'єром Шоткі з нанотемплетом текстурованого сапфіру.

Для шарів GaN, сформованих на нанотемплетах текстурованого сапфіру отримано низьку щільність дислокації проростання ( $\sim 5 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$ ), порівняну з шарами, сформованими за методикою епітаксійного бічного зарощування. Щільність дислокацій визначалася на основі дифузійної довжини нерівноважних носіїв за допомогою методу струмів, індукованих електронним променем (рис. 7).

Для УФ GaN фотодіодів з бар'єром Шоткі показано, що структури, сформовані на нанотемплетах текстурованого сапфіру, порівняно з фотодіодами без нанотемплетів, забезпечують крутіший довгохвильовий (375-475 нм) край нормованої фоточутливості, зменшуючи її на порядок в цьому діапазоні (рис. 7), що дозволяє обходитись без спеціальних фільтрів.

Для шарів акумуляції енергії в одному MOCVD технологічному циклі на нанотемплетах текстурованого сапфіру запропоновано формувати нанокарбіди, консолідовані фази AlCN або BCN в потоці триметилу алюмінію або триетилу бору, відповідно, а також шари гексагонального нітриду бору (h-BN), в який може бути інкапсульований графен [9, 10, 19].

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Осінський В.І. Темплетні шари для наногетероструктур Si/A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> / В.И. Осинский, П.В. Лабунов, Г.Г. Горох, Н.О. Суховий (Ляхова), Д.В.Соловей. // Электроника и связь. Тематический выпуск “Проблемы электроники”. – 2008. – №1-2 (ч.1).– С. 70-75. (Фахове видання, що входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РІНЦ).

*Особистий внесок дисертанта: експериментальне дослідження режимів MOCVD епітаксії GaN і InGaN на нанотемплетах АОА на основі запропонованої математичної моделі та інтерпретація результатів.*

2. Осинский В.И. Мощные светодиодные матрицы на анодированной алюминиевой подложке / В.И.Осинский, В.Г. Вербицкий, Н.О. Суховий (Н.О. Ляхова), В.М. Мацкевич, И.А. Тучинский // Электроника и связь. Тематический выпуск “Проблемы электроники”. – 2008. – №1-2 (ч.1). – С. 92-96. (Фахове видання, що входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РІНЦ).

*Особистий внесок дисертанта: участь у експериментальних дослідженнях по використанню анодованої алюмінієвої підкладки для матричної інтеграції потужних світлодіодів і визначенню основних технологічних вимог до виготовлення світлодіодних матриць на анодованому оксиді алюмінію та написанні статті.*

3. Глотов В.И. Кластерная модель образования нитрида алюминия в нанореакторах оксида

алюминия / В.И. Глозов, П.В. Деминский, Н.О. Суховий, И.В. Масол, В.И. Осинский // Электроника и связь. – 2011. – №4. – С. 40-44. (Фахове видання, що входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РІНЦ).

*Особистий внесок дисертанта: дослідження і розробка технології формування нанореакторів оксида алюмінію, участь у виконанні досліджень, інтерпретації результатів та написанні статті.*

4. Суховий (Ляхова) Н.О. Моделирование влияния темплетных размеров на дислокационность наноструктур при селективной эпитаксии III-нитридов // Электроника и связь. – 2011. – №3. – С.39. (Фахове видання, що входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РІНЦ).

*Особистий внесок дисертанта: теоретичний огляд стану та перспектив моделювання впливу темплетних розмірів на дислокаційність наноструктур, розробка математичної моделі з урахуванням темплетних параметрів, участь у виконанні досліджень, інтерпретації результатів та написання статті.*

5. Осинский В.И. Нанокاربидные процессы при МОС-эпитаксии III-нитридных структур / В.И. Осинский, Н.Н. Ляхова, И.В. Масол, Н.О. Суховий // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012 г. – №1. – Сс. 62–72. (Фахове видання, що входить до міжнародної наукометричної бази РІНЦ).

*Особистий внесок дисертанта: теоретичний огляд стану та перспектив застосування нанокарбідів та експериментальне дослідження і визначення термодинамічних параметрів (температура, тиск) та прекурсорів, при яких реалізується самоформування консолідованих нанокарбідів.*

6. Осинский В.И. Температурные и концентрационные свойства Si/A3B5 RGB источников света / В.И. Осинский, П.В. Деминский, Н.Н. Ляхова, И.В. Масол, Н.О. Суховий // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. – №2 (24). – Сс. 50–57. (Фахове видання, що входить до міжнародної наукометричної бази РІНЦ).

*Особистий внесок дисертанта: теоретичний аналіз, розробка моделі, виготовлення та експериментальне дослідження твердих розчинів  $In_{0,31}Ga_{0,69}N$ .*

7. Осинский В.И. Спектры фотолюминесценции GaN/InGaN МКЯ на GaN / В.И. Осинский, Н.Н. Ляхова, В.И. Глозов, Н.О. Суховий, О.С. Литвин, П.В. Деминский // Ученые записки физического факультета МГУ. – 2014. – №2. – Сс. 142304, 1–4. (Фахове видання, що входить до міжнародної наукометричної бази РІНЦ).

*Особистий внесок дисертанта: розробка базового безлітографічного технологічного маршруту передачі малюнку гексагональних нанопір темплету анодованого оксиду алюмінію на маску  $SiO_2$  з можливістю здійснення контролю розмірів і розташування малодфектних*

*неполярних наногетероструктур III-нітридів та інтерпретація результатів.*

8. Осинский В.И. Моделирование темплетных наноструктур / В.И. Осинский, В.И. Тимофеев, Н.М. Ляхова, О.В. Семеновська, Н.О. Суховий, О.М. Фалеева // Electronics and communications. – 2014 – № 5 (19). – Сс. 32-36. (Фахове видання, що входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РІНЦ).

*Особистий внесок дисертанта: постановка задачі і розрахунок впливу розузгодження ґраток наноструктур на умовно-бездислокаційний рельєф темплетних напівпровідникових нанотворень.*

9. Osinsky V.I. Integration of LED/SC chips (matrix) in reverse mode with solar energy storage / V.I. Osinsky, I.V. Masol, I. Kh. Feldman, A.V. Diagilev, N.O. Sukhovii // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2016. – V. 19, – № 2. – Pp. 215-219. (Фахове видання, що входить до міжнародних наукометричних баз WorldCat, Open Access Journals Index, Index Copernicus, Ulrich's Web).

*Особистий внесок дисертанта: дослідження спектральних характеристик світловипромінювачів у реверсивному режимі, участь у інтерпретації результатів та написанні статті.*

10. Osinsky V.I. Some technology aspects for quantum enestor through AІІІBV multicomponent nanoeptaxy / V.I. Osinsky, I.V. Masol, N.N. Lyahova, N.O. Suhoviy, M.S. Onachenko, A.V. Osinsky // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. - 2017. – V. 20, – № 2. – Pp. 254-258. (Фахове видання, що входить до міжнародних наукометричних баз WorldCat, Open Access Journals Index, Index Copernicus, Ulrich's Web).

*Особистий внесок дисертанта: теоретичний огляд стану та перспектив застосування та проведення досліджень щодо нанокарбідних процесів при МOCVD-епітаксії III-нітридів на нанотемплетах сапфіру для шарів акумулювання енергії та використання InGaN/GaN КТ з контрольованим розташуванням в якості однофотонних джерел випромінювання для квантових обчислень.*

11. Kachalova N. Photoluminescence of GaN/InGaN–multiple quantum wells formed on the GaN nanorods / N. Kachalova, V. Osinsky, N. Lyakhova, N. Sukhoviy, A. Sushiy, V. Voitsekhovich, A. Mamuta, V. Khomenko // Photonics. - 2014. - №1(43). – Pp. 86-91. (Фахове видання, що входить до міжнародної наукометричної бази РІНЦ).

*Особистий внесок дисертанта: розробка технологічних маршрутів для формування зразків GaN/InGaN МКЯ на «плоских» нанотемплетних шарах і на наностержнях нітриду галію для дослідження спектрів фотолюмінесценції.*

12. Патент на корисну модель 66594 України МПК Н 01 L 33/00, МПК Н 01 L 21/00 Пристрій для епітаксійного вирощування напівпровідникових гетероструктур АЗВ5 / Осинський

В.І., Ляхова Н.М., Суховій (Ляхова) Н.О.; заявник та патентовласник Осінський В.І., Суховій (Ляхова) Н.О., Ляхова Н.Н. - № U201107598; заявн. 16.06.2011; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. – 2 с., рис.

*Особистий внесок дисертанта: обґрунтування наукової новизни та участь у розробці газорозрядної комірки з алюмінієвими електродами, що забезпечують постачання складової сполуки AlN, а саме, алюмінію, завдяки алюмінієвим електродам газорозрядної комірки, що дозволяє позбутися небажаних домішок, зокрема вуглецю, із металоорганічних сполук та написання патенту.*

13. Патент на корисну модель 66595 України МПК Н 01 L 33/26. Напівпровідникова гетероструктура / Осінський В.І., Суховій (Ляхова) Н.О., Демінський П.В., Масол І.В.; заявник та патентовласник Осінський В.І., Суховій (Ляхова) Н.О., Демінський П.В., Масол І.В. - № U201107599; заявн. 16.06.2011; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. – 2 с.: рис.

*Особистий внесок дисертанта: участь у обговоренні наукової новизни, розробка і дослідження базової напівпровідникової гетероструктури з нанотемплатами АОА і можливістю формування наногетероструктур III-нітридів (нанодротів, нанокілець та квантових точок).*

14. Osinsky V. The Dependence of Si/AIIBV Light Source Photoluminescence Efficiency on Dynamic Displacements of Atoms in the Crystal Lattice / Osinsky V., Deminskiy P., Lyahova N., Suhoviy N., Honarmand H. // IEEE XXXIV International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kiev. – 2014. – С. 171.

*Особистий внесок дисертанта: розробка і дослідження технології InGaN/GaN КТ для високоефективних світлодіодів на кремнії.*

15. Timofeyev V. Simulation of Influence of Template Size on Misfit Dislocation in Nanostructures / Timofeyev V., Faleyeva E., Semenovskaya E., Andryushchenko A., Osinsky V., Lyahova N., Sukhovi N. // IEEE XXXIV International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kyiv. – 2014. – Р. 191.

*Особистий внесок дисертанта: розробка підходів до моделювання меж умовно-бездислокаційного рельєфу для GaN та GaAs наноструктур з нанотемплатами на AlN і Si підкладах, відповідно.*

16. Sukhovii (Lyahova) N.O. Simulation of porous Al anodic oxide template for GaN Selective Epitaxy // International scientific conference Electronics and Electronics and Nanotechnology. – Kyiv. – 2011. – Р. 93.

*Особистий внесок дисертанта: дослідження і розробка підходів до моделювання зародкоутворення дефектів у наноструктурах з 3-вимірним обмеженням для епітаксійного вирощування GaN матодом хлорид-гідридної епітаксії на Si(100) підкладці з АОА нанотемплатами.*

17. Осинский В.И. Механизмы роста III-нитридов в самоорганизованных нанореакторах оксида алюминия / В.И. Осинский, Г.Г. Горох, П.В. Деминский, Н.Н. Ляхова, В.А. Лабунов, Н.О. Суховий (Ляхова) // Материалы 8-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия, алюминия - структуры и приборы". – С.-Петербург. – 2011. – Сс. 192–195.

*Особистий внесок дисертанта: дослідження і розробка технології формування нанореакторів оксида алюмінію, участь у інтерпретації результатів та написанні статті.*

18. Осинский В.И. Формирование Si/SiO<sub>2</sub>/III-нитридных нанотемплетов / В.И. Осинский, Н.Н. Ляхова, И.В. Масол В.И. Глозов, Н.О. Суховий, О.С. Литвин / Тези доповіді 9-ї Всеросійської конференції "Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы". – МГУ – 2013.

*Особистий внесок дисертанта: Дослідження і розробка технології формування Si/SiO<sub>2</sub>/III-нітридних нанотемплетів.*

19. Osinsky V. From LED & LD to quantum processing for enestor through A3B5 multicomponent alloy nanoeptyaxi / Osinsky V., Lyahova N., Sukhovi N. // 2017 IEEE 37 International Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO) . – Kiev. – P.12 / 26 (oral session).

*Особистий внесок дисертанта: теоретичний огляд технологічних аспектів інтеграції Si-КМОН структур та InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> КТ з контрольованим розташуванням, що дає змогу реалізувати джерела однофотонного випромінювання для квантових обчислень.*

## АНОТАЦІЯ

**Суховій Н.О. Нанотемплети для гетероструктур нітридів III групи.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню застосувань і розробок технологічних рішень щодо формування нанотемплетів для гетероструктур III-нітридів, в тому числі з неполярною кристаллографічною орієнтацією, щодо забезпечення малодфектності і можливості одержання наноструктур (наностержнів, квантових точок, тощо) для їх практичної реалізації в оптоелектронних інтегральних схемах.

В ході досліджень для нітрид галію неполярної (11 $\bar{2}$ 0) орієнтації з використанням нанотемплетів анодованого оксиду алюмінію на Si(100) одержано щільність дислокацій  $3 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$ , що дає змогу формувати InGaN/GaN КЯ і КТ з підвищеним вмістом індію.

Згідно запропонованої спрощеної математичної моделі, встановлено, що може бути забезпечена низька щільність дислокацій при будь-якій глибині пір при радіусах пір  $< 10 \text{ нм}$ , одержання яких за допомогою нанотемплетів анодного оксиду алюмінію дуже проблематично. Проте, для MOCVD епітаксії були експериментально визначені термодинамічні параметри (температура, тиск) та прекурсори, при яких на поверхні сапфіру утворюються нанопори з радіусом  $< 10 \text{ нм}$ . На одержаних темплетах нанотекстурованого сапфіру була показана можливість в одному технологічному циклі вирощувати гетероепітаксійні шари III-нітридів з низькою щільністю дислокацій ( $\sim 5 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$ ).

*Ключові слова:* нанотемплети, гетероструктури, нітриди III групи, малодфектність, анодований оксид алюмінію.

## АННОТАЦИЯ

**Суховий Н.О. Нанотемплеты для гетероструктур нитридов III группы.** – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 - твердотельная электроника - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена комплексному исследованию применений и разработок технологических решений по формированию нанотемплетов для гетероструктур III-нитридов, в том числе с неполярной кристаллографической ориентацией, по обеспечению малодфектности и возможности получения наноструктур (наностержней, квантовых точек и т.д.) для их



практической реализации в оптоэлектронных интегральных схемах.

В ходе исследований для нитрид галлия неполярной  $(11\bar{2}0)$  ориентации с использованием нанотемплетов анодированного оксида алюминия на Si (100) получено плотность дислокаций  $3 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$ , что позволяет формировать InGaN / GaN КЯ и КТ с повышенным содержанием индия.

Согласно предложенной упрощенной математической модели, установлено, что может быть обеспечена низкая плотность дислокаций при любой глубине пор при радиусах пор  $< 10 \text{ нм}$ , получение которых с помощью нанотемплетов анодного оксида алюминия очень проблематично. Однако, для MOCVD эпитаксии были экспериментально определены термодинамические параметры (температура, давление) и прекурсоры, при которых на поверхности сапфира образуются нанопоры с радиусом  $< 10 \text{ нм}$ . На полученных темплатах нанотекстурированного сапфира была показана возможность в одном технологическом цикле выращивать гетероэпитаксионные слои III-нитридов с низкой плотностью дислокаций ( $\sim 5 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$ ).

*Ключевые слова:* нанотемплеты, гетероструктуры, нитриды III группы, малодефектность, анодированный оксид алюминия.

## SUMMARY

**Sukhovii N.O. Nanotemplates for heterostructures of nitrides of group III.** – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a candidate of technical science degree in speciality 05.27.01 «Solid-state electronics». – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2018.

This work studies application and development of technological solutions for the formation of nanotemplates for heterostructures of III-nitrides, including those with nonpolar crystallographic orientation, in order to ensure a low density of defects and the possibility of obtaining nanostructures (nanorods, quantum dots, etc.) for their practical implementation in optoelectronic integrated circuits.

The approach to defect nucleation modeling in three-dimensional confined nanoislands of templated nanostructures was considered in order to ensure a low density of dislocation of heterostructures.

It is determined that the developed nano-templates of anodized aluminum oxide formed in a solution of 0,05M oxalic acid can provide satisfactory homogeneity and periodicity of pores, and the statistical distribution of their diameters over the surface area, as established by atomic force microscope, is characterized by a bimodality: their predominant number was determined by diameters of  $\sim 20\text{-}30 \text{ nm}$  or  $55\text{-}100 \text{ nm}$ , which, according to the proposed simplified mathematical model, may provide expediency for considering such nano-templates in experiments to ensure for low dislocation density and controllable size and location of nanostructures.

It was investigated and proved the possibility of using on the silicon anodic alumina nano-templates, optimal according to the simplified mathematical model of the defect generation process, for growth by the method of chloride-hydride gas-phase epitaxy of non-polar  $\alpha$ -GaN with crystallographic orientation (11 $\bar{2}$ 0) and low stacking fault defect density, compared with results on the basis of methods of one-stage lateral growth or using buffer layers on sapphire and silicon carbide, respectively.

The technological process, which is not lithographic, is investigated and developed in relation to the formation of nonpolar nano-heterostructures of III-nitrides with low defect density and the ability to control the size and location (nanowires, nanoclusters and quantum dots) on the basis of the transfer of a picture from hexagonal nano pores from anodized oxide templates aluminum on a SiO<sub>2</sub> mask. In a study by the method of translucent electron microscopy, it was determined that the cross sections of GaN nanorods have vertical side walls, cone-shaped frame, and their height is determined by the thickness of the SiO<sub>2</sub> mask, and the density of the dislocations at the same time is  $\sim 3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ .

The photoluminescence characteristics of heterostructures with 4-period GaN/InGaN quantum wells, formed on the GaN system of nanorods and on planar GaN layers, were studied. It was demonstrated that the intensity of the peak of photoluminescence of GaN / InGaN structures with quantum wells on nanorods is three times higher compared with planar variant, which can be explained by the presence of quantum dots and quantum rings on facet surfaces. At the same time, the peak of the radiation (464 nm) is shifted by 36 nm into the long-wave region (a maximum of 500 nm), indicating an increase in the indium in the quantum well due to the cone-shaped framing, which for the faceted surfaces of the nanorods determines the nonpolar and polupolar crystallographic orientation and, accordingly, the possibility entering the greater part of indium into the crystal lattice of InGaN.

It was identified the possibility of integrating Si-CMOS technology with the developed process of formation of InGaN / GaN quantum dots, which is known to show a large binding energy of excitons ( $> 26 \text{ meV}$ ), and is an ideal candidate as sources of single-photon radiation for high-temperature quantum information processing , quantum cryptography and quantum entusiastics. in contrast to the quantum dots of the Stransky-Krastanov type with great chaos in relation to the variations in dimensions and locations. According to the proposed simplified mathematical model, it has been established that a low density of dislocations can be provided at any depth of the pore at radii of pore  $< 10 \text{ nm}$ , which is very problematic with the use of nanodimensions of anodic alumina.

However, for the MOCVD epitaxy (horizontal reactor, EPIQUIP equipment), thermodynamic parameters (temperature, pressure) and precursors were experimentally determined, in which nanopores with a radius of  $< 10 \text{ nm}$  were formed on the sapphire surface. It was shown that It was possible to grow heteroepitaxial layers of III-nitrides with a low density of dislocations, as well as to form consolidated phases of nanocarbides encapsulated in the atomic structure of aluminum or boron carbonitride on the obtained templates of nanotexted sapphire in one technological cycle.

The application of the obtained nano-templates of textured sapphire was considered for UV photodiodes and energy storage layers that can be used in optoelectronic integrated circuits for space, biological and military purposes due to the high thermal, chemical and radiation resistance of both sapphire and III-nitrides, where the traditional silicon does not fit.

It was obtained low dislocation density ( $\sim 5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ) comparable to structures formed by the method using epitaxial lateral overgrowth for GaN layers formed on such nano-templates of textured sapphire. The dislocation density was determined on the basis of the diffusion length of nonequilibrium carriers through the electron-beam-induced current method.

For UV GaN photodiodes with Schottky barrier, it is shown that the structures formed on nano-templates of textured sapphire, in comparison with photodiodes without nano-templates, provide a steeper long-wave (375-475 nm) edge of normalized photosensitivity, decreasing it by an order of magnitude in this range, which allows to handle without special filters.

For energy accumulation layers, in one MOCVD technological cycle on the textured sapphire nano-templates, it was proposed to form nano-carbides, consolidated AlCN or BCN phases in a stream of trimethyl aluminum or triethyl boron, respectively, as well as layers of hexagonal boron nitride (h-BN), in which graphene can be encapsulated.

*Keywords:* nanotemplate, heterostructures, nitrides of the III group, little defect, anodized aluminum oxide, photodetectors.